Iranian Food Science and Technology
Research Journal
Homepage: https://ifstrj.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 2, May.-Jun., 2025, p. 179-198

Improving the Physico-mechanical Properties of Extruded Rice Based on Mixed Rice-quinoa Flours Using Pickering Emulsion-filled Gel Containing Beta-carotene

M. Davtalab[1], S. Naji-Tabasi[1*], M. Shahidi-Noghabi[2]

1- Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: s.najitabasi@rifst.ac.ir)
2- Department of Green Technologies in Food Production and Processing, Research Institute of Food Science and Technology (RIFST), Mashhad, Iran

Received:	31.08.2024	**How to cite this article:**
Revised:	12.12.2024	Davtalab, M., Naji-Tabasi, S., & Shahidi-Noghabi, M. (2025). Improving the physico-mechanical properties of extruded rice based on mixed rice-quinoa flours using Pickering emulsion-filled gel containing beta-carotene. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, *21*(2), 179-198. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.89650.1361
Accepted:	25.12.2024	
Available Online:	23.04.2025	

Introduction

Rice is a strategic product and considered as staple food of over half of the world's population particularly in Iran. Considering the high levels of rice waste, including broken grains or those of lower quality, it can be utilized for producing value-added foods and reducing waste. Extrusion is a process widely used to improve food products and develop fortified foods. Quinoa flour is rich in phenols, and can be utilized to produce fortified extruded rice. The extrusion of gluten free flours like rice and quinoa has different challenges. In this study, sodium alginate was used to prepare emulsion filled gel to enhance the stability of Pickering emulsions containing β-carotene and also structuring rice during extrusion process. Pickering emulsion is one of the encapsulation methods suitable for encapsulating lipophilic compounds like β-carotene. Emulsion-filled gels, developed using hydrocolloid mixtures, significantly enhance emulsion stability and make them suitable for aqueous food environments. Finally, extruded rice based on a mixture of rice- quinoa flours and fortified with beta-carotene was prepared, and its physico-mechanical properties were evaluated.

Materials and Methods

Pickering emulsions were stabilized using whey protein- cress gum soluble complex nanoparticles. Beta-carotene was dissolved in the oil phase at a concentration of 0.1%. Subsequently, 4% (w/v) sodium alginate was used to develop emulsions filled-gel.

The Pickering emulsion was dispersed in the sodium alginate gel at a ratio of 15:85. Extruded rice was then prepared using an equal ratio (50:50) of broken rice flour and quinoa flour via a cold extruder. To evaluate the impact of the gel-filled emulsion on improving the characteristics of rice grains, different concentrations (30%, 35%, and 40% w/w) of the gel-filled emulsion (based on flour weight) were added to the mixture. The physico-mechanical tests (moisture content, ash content, optimum cooking time, water absorption ratio, cooking loss, lateral expansion, textural characteristics of rice, color properties, sensory analysis, structural morphology, Beta-carotene stability) were conducted. Duncan test was utilized to identify statistically significant differences ($p<0.05$) among the means, while one-way analysis of variance (ANOVA) was employed to investigate the impact of various factors.

Results and Discussion

The incorporation of emulsions filled-gel into quinoa-rice blend significantly influenced the physico–

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.89650.1361

mechanical properties of extruded rice. As the concentration of emulsions filled-gel increased from 30% to 40% (w/w), there was a significant increase in moisture content, ash content, expansion ratio, and cooking time. Extruded rice samples with emulsion-filled gel exhibited significantly greater β-carotene stability than those without, both after cooking and during storage. Conversely, adhesiveness decreased while hardness increased with increasing emulsion filled-gel concentrations. The control sample exhibiting the highest adhesiveness and lowest hardness. The lightness of the extrudates was also improved with increasing emulsion filled-gel levels, reaching a maximum at 40% (w/w). Sensory evaluation revealed that the 40% emulsion filled-gel level was the most preferred sample by panelists. The optimized extruded rice closely resembled natural Hashemi rice in terms of sensory and textural properties.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that the addition of emulsions filled-gel enriched with beta-carotene can effectively enhance the physico-mechanical properties of extruded quinoa-rice blends. Specifically, increasing the emulsion concentration resulted in improving expansion, textural, and appearance properties of the rice. 40% emulsion filled-gel was found to be optimal, resulting in a product with desirable sensory attributes. This research proposes that extruded rice based on mixed rice-quinoa flours enriched with beta-carotene-loaded emulsion-filled gel can provide a nutritious and appealing alternative to broken rice products, leveraging the nutritional benefits of quinoa. Sensory and textural evaluation revealed that the extruded rice exhibited sensory properties highly similar to natural Hashemi rice, coupled with favorable cooking characteristics. Consequently, it can be introduced as a suitable substitute for natural rice.

Keywords: β-carotene, Cress seed gum, Pickering, Quinoa, Whey protein

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
https://ifstrj.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۱، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۴، ص. ۱۹۸-۱۷۹

بهبود خصوصیات فیزیکومکانیکی برنج اکسترود شده مخلوط آرد کینوا-برنج با استفاده از ژل پرشده- امولسیون پیکرینگ حاوی بتاکاروتن

مریم داوطلب[۱]- سارا ناجی طبسی[۱*]- مصطفی شهیدی نوقابی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵

چکیده

این تحقیق به بررسی اثر بهبوددهندگی ژل‌پرشده امولسیونی حاوی بتاکاروتن بر پارامترهای کیفی برنج اکسترودشده مخلوط آرد کینوا-برنج پرداخته است. برنج اکسترودشده حاوی سطح‌های مختلف ژل پرشده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) تهیه شد و با نمونه برنج اکسترود شده بدون حضور ژل پرشده امولسیونی (نمونه کنترلی) مورد مقایسه قرار گرفت. ژل پرشده امولسیونی با استفاده از بستر ژلی آلژینات سدیم (غلظت ۴ درصد وزنی- وزنی) و امولسیون پیکرینگ (۱۵ درصد حجمی/حجمی حامل بتاکاروتن با غلظت ۰/۱ درصد) تهیه گردید. با افزایش غلظت ژل پر شده امولسیونی از ۳۰ به ۴۰ درصد وزنی- وزنی، افزایش در میزان رطوبت، خاکستر، افزایش قد و زمان پخت دانه‌های برنج اکسترود شده مشاهده شد. در مقابل کاهش چسبندگی و افزایش سختی با افزایش افزودن غلظت ژل پر شده امولسیونی همراه بود. نمونه کنترل بیشترین چسبندگی و کمترین سختی را نشان داد. شفافیت دانه‌های برنج اکسترود شده نیز با افزایش سطح ژل پرشده امولسیونی بهبود یافت و در سطح ۴۰ درصد به حداکثر رسید. ارزیابی حسی نشان داد که نمونه با سطح ۴۰ درصد وزنی-وزنی ژل پرشده امولسیونی بیشترین امتیاز را از نظر پذیرش کلی و سایر پارامترهای حسی دارا است. مقایسه خواص حسی و بافتی نمونه بهینه برنج اکسترود شده مخلوط آرد کینوا- برنج با برنج طبیعی واریته هاشمی، خواص حسی نزدیک به نمونه طبیعی و ویژگی‌های پخت مناسب را نشان داد و در نتیجه می‌توان آن را به‌عنوان جایگزینی مناسب برای برنج طبیعی معرفی کرد.

واژه‌های کلیدی: بتاکاروتن، پیکرینگ، پروتئین آب پنیر، صمغ دانه شاهی، کینوا

مقدمه

برنج یک محصول استراتژیک در کشور و از اصلی‌ترین زنجیره‌های غذایی است. برنج آسیاب نشده یک منبع غنی از مواد مغذی ماکرو و میکرو است که طی آسیاب برنج، چربی و لایه‌های سبوس غنی از ریزمغذی‌ها حذف می‌شوند و برنج سفید غنی از نشاسته تولید می‌شود. از این‌رو توجه به برنج به‌عنوان ماده غذایی هدف برای غنی‌سازی حائز اهمیت است (Waterhouse & Sun-Waterhouse, 2019). فرآیند اکستروژن روشی است که امروزه کاربرد زیادی در بهبود ارزش غذایی محصولات غذایی و یا توسعه غذاهای غنی شده دارد. کمک به تولید محصولات متنوع با خواص بافتی ویژه مانند انبساط، تردی و احساس دهانی از دیگر کاربردهای فرآیند اکستروژن هست. این روش با استفاده از نیروهای مکانیکی، فشار و دما سبب تغییر در ساختار مولکولی نشاسته و پروتئین می‌شود زیرا در فرآیند اکستروژن، نشاسته موجود در مواد اولیه ژلاتینه شده و پروتئین‌ها دناتوره می‌شوند که در نهایت سبب ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی در مواد اولیه شده

۱- گروه نانوفناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: s.najitabasi@rifst.ac.ir)
۲- گروه فناوری‌های سبز مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران

https://doi.org/10.22067/ifstrj.2024.89650.1361

و محصول نهایی با خواص مورد نظر تولید می‌شود (Tangjaidee, Xiang, Yin, Wen, & Quek, 2019). کینوا یکی از انواع غلاتی هست که برای تولید محصولات بدون گلوتن استفاده می‌شود. کینوا سرشار از فنل است که به‌دلیل خاصیت آنتی‌اکسیدانی بالا، خاصیت ضد التهابی و عملکردهای بیولوژیکی خاص، برای سلامت انسان مفید است. چالش استفاده از غلات بدون گلوتن در تولید این نوع محصولات، ویژگی‌های ساختاری خاص آن‌هاست که تولید محصولات غذایی با کیفیت مورد نظر را سخت می‌کند (Godoy, 2015).

انکپسولاسیون، قابلیت حفاظت و پوشش‌دهندگی طیف گسترده‌ای از ترکیبات مورد نظر بوسیله تعبیه آن‌ها درون بستر محافظتی را دارد. از جمله ویژگی‌های یک فرآیند انکپسولاسیون مطلوب، قابلیت پخش شدن ترکیبات چربی دوست در محیطهای آبی، حفظ کردن ترکیبات مورد نظر از دسترس مواد واکنش دهنده نامطلوب، قابلیت دستکاری و اصلاح مواد، دستیابی به انتشار هدفمند، بهبود ثبات ذخیره‌سازی مواد، پوشش‌دهندگی طعم یا بو می‌باشد (Rehman *et al.*, 2019). گروه بزرگی از ترکیبات غذایی ارزشمند مانند انواع ویتامین‌ها، ترکیبات مولد عطر و طعم و ... را ترکیبات چربی دوست تشکیل می‌دهند. روش تولید امولسیون معمولا برای انتقال ترکیبات چربی‌دوست کاربرد زیادی دارد زیرا تحقیقات نشان داده عملکرد مطلوب آن در پایداری شیمیایی و کنترل رهایش هدفمند قابل توجه است (Buyukkestelli & El, 2019). امولسیون پیکرینگ [1] نوعی از امولسیون هست که توسط ذرات جامد تثبیت می‌شوند و مانند سایر روش‌های تولید امولسیون نیازی به پایدارسازی با سورفاکتانت‌های مصنوعی (مانند توپین) یا با منشاء حیوانی (مانندپروتئین تخم مرغ و شیر) ندارند (Wang *et al.*, 2017). از سوی دیگر گزارش شده در مقایسه با امولسیون‌های تثبیت شده با سورفاکتانت‌های معمول، پیکرینگ امولسیون‌ها در برابر در هم آمیختگی و پدیده تکامل استوالد [2] مقاوم‌ترند (Zhu, 2019).

امولسیون پیکرینگ مانند همه انواع امولسیون‌ها، از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدارند و از سوی دیگر به‌دلیل اینکه بیشتر در حالت مایع می‌باشند کاربرد آن‌ها در فرمولاسیون‌های پیچیده مواد غذایی اصولا یک چالش است (Lim *et al*., 2020). استفاده از یک شبکه سه بعدی هیدروژلی که دارای اتصالات عرضی است می‌تواند قطرات امولسیون را در خود جای دهد و باعث عدم تحرک قطرات در این بستر شود. یک ژل پر شده امولسیونی قابلیت انتقال هر دو دسته از ترکیبات آبدوست و آبگریز را دارد (Taheri & Jafari, 2019). ژل‌های پر شده امولسیونی به‌طور کلی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند، دسته اول که ژل‌پرشده امولسیونی [3] نامیده می‌شوند، قطرات امولسیون در بستر هیدروژلی پراکنده می‌شوند اما در دسته دوم، قطرات امولسیون در کنار هم تجمع یافته و به‌صورت قطرات چربی بزرگتری در بستری هیدروژلی جای خواهند گرفت که ژل پرشده امولسیونی ذره‌ای [4] نامیده می‌شوند (Farjami & Madadlou, 2019). در این نوع از ژل‌های پر شده امولسیونی، به‌دلیل پراکندگی قطرات امولسیون در بستر پلیمری، مقادیر کمتری از ترکیب روغنی جهت ایجاد طعم و یا ویژگی‌های عملکردی مورد نیاز است که از این ویژگی جهت تولید غذاهای کم کالری و رژیمی می‌توان استفاده کرد (Nourbehesht, Shekarchizadeh, & Soltanizadeh, 2018). کارتنوئیدها رنگدانه‌های طبیعی هستند که در میوه و سبزیجات یافت می‌شوند. مطالعات نشان داده است مصرف منظم بتاکاروتن در مواد غذایی ممکن است خطر ابتلا به بیماری‌هایی مانند آب مروارید، بیماری‌های قلبی عروقی و برخی از انواع سرطان‌ها را کاهش دهد. بتاکاروتن مهمترین پیش‌ساز ویتامین A می‌باشد و همچنین به‌عنوان یک ترکیب آنتی‌اکسیدانی جهت کاهش رادیکال‌های آزاد می‌تواند عمل کند (Radu, Litescu, Albu, Teodor, & Truica, 2012). اما حلالیت کم بتاکاروتن در آب، کاربرد و قابلیت دسترسی زیستی آن را محدود می‌کند. همچنین مولکول‌های کاروتن حاوی پیوندهای دوگانه کونژوگه هستند که حساس به اشعه ماوراء بنفش، گرمایش، یون‌ها و اکسیژن هستند (Rostamabadi, Falsafi, & Jafari, 2019). نانوذرات هیدروژلی کمپلکس پروتئین–کربوهیدرات به‌عنوان پایدارکننده در امولسیون‌های پیکرینگ موفق‌تر هستند و با قابلیت شکل‌پذیری و ویسکوزیته سطحی رفتار پایدارکنندگی را افزایش می‌دهند (Semenova, 2017).

دانه شاهی [5] حاوی مقادیر زیادی موسیلاژ است. وجود قند مانوز فراوان در این هیدروکلوئید، پیوندهای بین زنجیره‌ای بیشتری را در این پلیمر ایجاد کرده و به آن خاصیت ژل دهندگی می‌بخشد (Naji, Razavi, & Karazhiyan, 2012). پروتئین آب پنیر به‌دلیل دو خاصیت ژل‌دهندگی و امولسیفایری، برای تولید سامانه ژل امولسیونی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. پروتئین آب پنیر قابلیت تشکیل ژل به روش‌های مختلف سرد و گرم را داراست که تشکیل ژل به روش سرد برای درون پوشانی ترکیبات حساس به حرارت مناسب‌تر است (Iqbal, Chen, Kirk, & Huang, 2020).

از این‌رو در این پژوهش برای تولید برنج غنی‌سازی شده از ساختار ژل پرشده-امولسیون پیکرینگ حاوی بتاکاروتن استفاده شد. با هدف کاهش مصرف مقادیر زیاد امولسیفایرهایی که اثرات منفی بر سلامت

1- Pickering emulsion
2- Ostwald ripening
3- Emulsion-filled gels
4- Emulsion particulate gels
5- Garden Cress

انسان دارد از نانوذرات تهیه شده بر پایه کمپلکس محلول پروتئین آب پنیر-صمغ دانه شاهی جهت تهیه ذرات پیکرینگ برای پایدارسازی امولسیون حاوی ترکیبات لیپیدی (بتاکاروتن) استفاده شد. سپس آلژینات سدیم برای تهیه ژل پرشده امولسیون پیکرینگ به کار گرفته خواهد شد تا پایداری سیستم ریزپوشانی برای انتقال در برنج اکسترود شده افزایش یابد و همچنین به ایجاد ساختار در برنج هنگام اکستروژن کمک نماید. در نهایت برنج کامپوزیت اکسترود شده برپایه مخلوط آردهای کینوا-برنج و غنی‌سازی شده با بتاکاروتن تهیه و ویژگی‌های فیزیکومکانیکی بررسی و با برنج هاشمی مورد مقایسه قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

آرد برنج هاشمی از شرکت مشعوف (رودسر) تهیه شد. آرد کینوا، شکر، نمک سدیم کلرید، و منو‌و‌دی گلسیرید تجاری خریداری شدند. بذر شاهی (*Lepidium sativum* L.) از یک بازار محلی (مشهد، ایران) خریداری شد. پروتئین آب پنیر غلیظ (WPC) (محتوای پروتئین: ۸۵ درصد (db)) از شرکت هیلمار (آمریکا) تهیه شد. کلرید کلسیم ($CaCl_2$) و سایر مواد شیمیایی از شرکت سیگما آلدریچ (آلمان) تامین شد. روغن ذرت (Fula، Sovena، پرتغال) از بازار محلی (براگا، پرتغال) خریداری شد.

روش تولید ذرات جامد امولسیون پیکرینگ

در مرحله اول، محلول‌های کنسانتره پروتئین آب پنیر (۱/۷۵ درصد وزنی/وزنی) و صمغ شاهی (۰/۳۱ درصد وزنی/وزنی) تهیه و هر دو در طول یک شبانه روز نگهداری شدند تا هیدراتاسیون در دمای ۴ درجه سانتی گراد کامل شود. محلول کنسانتره پروتئین آب پنیر در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به‌مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شد و بلافاصله سرد شد. سپس محلول صمغ شاهی و محلول پروتئین آب پنیر با استفاده از همزن مغناطیسی با سرعت ۴۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱ ساعت (۵۰:۵۰) مخلوط شدند. برای ایجاد کمپلکس محلول، pH محلول با استفاده ازpH متر (Metrohm-780, Germany) در بالای نقطه ایزوالکتریک پروتئین (pH= ۶) تنظیم شد. سپس کلرید کلسیم (۱/۶۹ میلی‌مولار) به‌صورت قطره‌ای به محلول تحت شرایط هم زدن مغناطیسی (۳۰۰۰ دور در دقیقه) در دمای محیط اضافه شد. محلول بلافاصله توسط دستگاه فراصوت (VCX750، شرکت SONICS، انگلستان) در دامنه ۸۰ درصد با پالس ۵ ثانیه روشن و پالس ۵ ثانیه خاموش، به‌مدت ۱۰ دقیقه در حمام یخ برای کنترل دما تیمار شد (Davtalab *et al.*, 2024).

روش تولید امولسیون پیکرینگ

نمونه‌های امولسیون پیکرینگ توسط نانوذرات پروتئین آب پنیر-صمغ شاهی در غلظت ۱ درصد (وزنی/حجمی) به‌عنوان فاز پیوسته امولسیون پیکرینگ تهیه شدند. نسبت روغن ذرت (۱۵ درصد حجمی/حجمی) به محلول حاوی نانو ذرات جامد (۸۵ درصد (حجمی/حجمی) اضافه شد. سپس امولسیون ها با استفاده از دستگاه اولتراتوراکس (T25 digital Ultraturrax، آلمان) در سرعت ۱۷۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه همگن شدند. سپس تیمار امولسیون‌های ثانویه با استفاده از دستگاه فراصوت (VCX750, SONICS Company, England) در دامنه ۴۵ درصد با پالس ۳ ثانیه و پالس ۳ ثانیه خاموش، به‌مدت ۵ دقیقه انجام شد و در حمام آب و یخ تیماردهی شد (Davtalab *et al.*, 2024).

روش تولید ژل پرشده امولسیونی

ژل پرشده امولسیونی بارگذاری شده با ترکیب مغذی β کاروتن، با استفاده از آلژینات سدیم به‌عنوان بستر پلیمری، امولسیون پیکرینگ پایدار شده با پروتئین آب پنیر-صمغ شاهی حامل β کاروتن و کلرید کلسیم به‌عنوان عامل اتصال عرضی بین پرکننده (امولسیون پیکرینگ) و بستر ژلی تهیه شد. ابتدا پودر آلژینات سدیم با غلظت ۴ درصد وزنی-حجمی در آب مقطر حل شد و پس از یک شبانه روز هیدراته شدن مورد استفاده قرار گرفت. سپس امولسیون پیکرینگ با نسبت ۱۵ درصد حجمی/حجمی طبق روش گزارش شده در پژوهش پیشین تهیه و به تدریج به آن اضافه شد. کلرید کلسیم با غلظت ۱ درصد وزنی/حجمی تهیه و برای تشکیل اتصالات عرضی به سیستم ژل پرشده امولسیونی اضافه شد (Davtalab *et al.*, 2024).

روش تهیه برنج

برنج اکسترود شده، با استفاده از آرد برنج شکسته و آرد کینوا با نسبت برابر (۵۰:۵۰) و به روش اکسترودر سرد تهیه شد. قطر خروجی نازل، یک میلی‌متر و مقدار رطوبت خوراک برابر با ۱۲ درصد بود. سایر مواد تشکیل‌دهنده خمیر برنج (بر اساس وزن آرد) شامل ۲ درصد کلسیم کلرید، ۰/۵ درصد سدیم کلرید، ۰/۶۵ درصد امولسیفایر، ۰/۵ درصد شکر و ۱۵ درصد نشاسته ذرت بودند که در همزن باهم مخلوط شدند. سپس با هدف ارزیابی تأثیر ژل پر شده امولسیونی بر بهبود ویژگی‌های دانه برنج، غلظت‌های مختلف (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) ژل پر شده امولسیونی (بر پایه وزن آرد) به مخلوط اضافه شد. همچنین نمونه کنترلی بدون حضورژل پر شده امولسیونی نیز تهیه شد. خمیر نهایی به مدت ۱۰ دقیقه ورز داده شد و به مخزن اکسترودر منتقل و تحت فشار قرار گرفت. محصول اکسترود شده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تحت

شرایط جریان هوا برای مدت زمان ۶ ساعت خشک شد. پس از خشک شدن، برنج اکسترود شده بلافاصله تا دمای محیط (۲۵ درجه سانتی گراد) خنک و بسته‌بندی شد (Naji- Tabasi, Shahidi- Noghabi, Modiri Dovom, & Davtalab, 2023a).

آزمون‌ها

رطوبت

میزان رطوبت طبق روش استاندارد (۲۰۰۵) AOAC و با سه تکرار اندازه‌گیری شد. نمونه‌های برنج در ابتدا وزن شد و سپس در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ ساعت قرار داده شد و با فاصله زمانی توزین شد تا به وزن ثابت برسند و سپس در دسیکاتور قرار داده شد. مقدار رطوبت به‌صورت تفاوت بین وزن اولیه و وزن نهایی محاسبه شد.

خاکستر

مقدار خاکستر نمونه‌های برنج اکسترود شده بر اساس روش استاندارد AOAC (۲۰۰۰) اندازه‌گیری شد (Committee, 2000). نمونه برنج اکسترود شده (۳ گرم) در بوته‌های سیلیکا ریخته شد و روی مشعل سوزانده شده است. سپس نمونه‌های ذغالی شده در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند تا زمانی‌که نمونه کاملاً در آن سفید بشوند. نمونه‌ها پس از سرد شدن در دسیکاتور قرار داده شدند و توزین شدند. تفاوت بین وزن اولیه و وزن نهایی به‌عنوان درصد خاکستر گزارش شد.

تعیین زمان پخت بهینه

زمان پخت نمونه‌های برنج اکستروژن با غلظت‌های مختلف ژل پرشده امولسیونی (۴۰، ۳۵ و ۳۰ درصد وزنی/وزنی) اندازه‌گیری شد. در این روش ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر را در یک بشر ۲۰۰ میلی‌لیتری ریخته و در حالت جوش قرار داده شد. ۵ گرم نمونه برنج در آب جوش ریخته و پخت دانه‌های برنج اکستروژن تا زمان مشاهده سفید شدن مرکز نشاسته‌ای ادامه داده شد و زمان ثبت شده به‌عنوان زمان پخت دانه برنج گزارش شد. در فواصل زمانی ۱ دقیقه، ۱۰ نمونه دانه برنج گرفته شد و بین شیشه کشویی فشار داده شد تا وجود هسته سفید مشخص شود. از بین رفتن هسته سفید نشان‌دهنده رسیده بودن برنج است. سایر ویژگی‌های پخت برنج پس از تعیین زمان پخت در شرایط بهینه مورد ارزیابی قرار گرفت (Xiong *et al*., 2023).

جذب آب

نسبت جذب آب (WAR) بر اساس تحقیقات قبلی با سه تکرار اندازه‌گیری شد. در این روش ۲ گرم از آرد نمونه برنج اکسترود شده در حجم ۲۰ میلی لیتر آب مقطر در لوله های سانتریفیوژ ۵۰ میلی لیتری در مدت زمان ۱۰ دقیقه با آن مخلوط گردید. سپس با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه در بازه زمانی ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد (Naji - Tabasi, Shahidi - Noghabi, Modiri Dovom, & Davtalab, 2023b).

$$\text{نسبت جذب آب (درصد)} = \frac{(W2-W1)\times 100}{W1} \quad (۱)$$

که در آن W_1 وزن اولیه دانه‌های برنج و W_2 مقدار وزن دانه بعد از پخت هست.

میزان از دست دادن مواد جامد در آب پخت (افت پخت[1])

۵ گرم دانه برنج پس از پخت ، با ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر سرد (۲۰ درجه سانتی‌گراد) شست و شو داده شد. آب حاصل از پخت و پز و آب بعد از شستشو در ظرفی جمع‌آوری شد و سپس در آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تا وزن ثابت خشک شد. میزان افت پخت بر اساس اختلاف وزن ماده خشک جمع‌آوری شده در آب پخت و شت و شو با وزن اولیه دانه برنج محاسبه شد (Qadir & Wani, 2023).

میزان افزایش قد برنج بعد از پخت

میزان افزایش قد دانه‌های برنج اکستروژن شده تحت تأثیر غلظت های مختلف ژل پرشده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و۴۰ درصد وزنی /وزنی)، با اندازه‌گیری اختلاف اندازه دانه برنج قبل و بعد از پخت و بر اساس درصد بیان گردید (Mirzaei, Movahhed, Asadollahzadeh, & Ahmadi Chenarbon, 2021).

بررسی ویژگی‌های بافتی برنج

آزمون بافت‌سنجی دانه‌های برنج اکسترود شده توسط دستگاه بافت سنج (TA-XT Plus Texture Analyser، انگلستان) اجراشد. آزمایش مکانیکی مورد استفاده آزمون برش بوده که با استفاده از پروب تیغه‌ای (BLADE, HDP/BSW) انجام گردید. سرعت پروب، ۱ میلی‌متر بر ثانیه و تغییر شکل ۵۰ درصد بود که توسط آن، پارامترهای سختی و چسبندگی برای برنج پخته و برنج خام در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شد (Bouasla & Wójtowicz, 2021).

1- Loss factor

بررسی ویژگی‌های رنگی بعد از پخت

ابتدا تصاویردانه‌های برنج اکسترود شده با سه غلظت مختلف ژل پرشده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) به‌صورت خشک و پخته توسط اسکنر (Canon، مدل LiDE220) اسکن شدند. سپس از نرم‌افزار ImageJ (نسخه ۱.۴۸ a، آمریکا) خواص رنگی نمونه‌ها در فضای رنگی $L^*a^*b^*$ مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی شامل L^* (میزان روشنایی (۱۰۰-۰))، a^* (قرمزی (۱۲۰+)) تا سبزی (۱۲۰-)) و b^* (زردی (۱۲۰+) تا آبی (۱۲۰-)) بود (Naji- Tabasi *et al.*, 2023a).

بررسی خصوصیات حسی

ارزیابی حسی نمونه‌های برنج اکسترود شده با سه غلظت مختلف ژل پرشده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) در مرحله پس از پخت در شرایط بهینه انجام شد و با نمونه کنترلی (بدون حضور ژل پرشده امولسیونی) مقایسه گردید. خصوصیات حسی مورد بررسی شامل رنگ، ظاهر، عطر، طعم، بافت و پذیرش کلی بود که با همکاری ۲۲ نفر داور چشایی انجام شد. از داوران خواسته شد در فاصله ارزیابی حسی هر دو نمونه مقداری از نوشیدنی گرمی که در اختیار آنها قرار گرفته بود، بنوشند. سپس از آزمون مقیاس هدونیک ۵ نقطه‌ای جهت گزارش استفاده شد (Naji- Tabasi *et al.*, 2023a; Sumardiono, Kusumayanti, Prakoso, Paundrianagari, & Cahyono, 2021).

بررسی پایداری بتاکاروتن در برنج اکسترود شده طی دوره نگهداری و بعد از پخت

جهت بررسی میزان حفظ بتاکاروتن در ساختار برنج پس از پخت، میزان بتاکاروتن قبل و بعد از پخت اندازه‌گیری شد و میزان باقیمانده در برنج به‌صورت درصد محاسبه گردید. جهت اندازه‌گیری بتاکاروتن قبل از پخت، ۰/۶گرم از نمونه‌های برنج آسیاب شده و با ۱ میلی‌لیتر اتانول ۷۰٪ و ۰/۸ میلی‌لیتر هگزان استخراج شدند. مخلوط به‌مدت ۲۰ دقیقه تکان داده شد و سپس با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس لایه بالایی عصاره حاوی هگزان با استفاده از میکروپیپت جمع‌آوری شد و توسط دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۴۵۳ نانومتر جذب خوانده شد. جهت اندازه‌گیری مقدار بتاکاروتن در ساختار بعد از پخت، ۵ گرم برنج در ۱۰۰ سی‌سی آب در شرایط پخت بهینه حرارت داده شد و پس از آب‌کش کردن، برنج خشک شد. سپس استخراج بتاکاروتن از ساختار برنج با توجه به روش توضیح داده شده انجام شد. نگهداری برنج طی ۳۰ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط رطوبت‌کنترل شده در دسیکاتور انجام شد.

میزان درصد حفظ بتاکاروتن در ساختار برای نمونه برنج به روش زیر محاسبه شد (Miazek, Beton, Śliwińska, & Brożek-Płuska, 2022):

$$\text{پایداری بتاکاروتن } (\%) = C_1 - C_2 / C_1 \times 100 \qquad (۲)$$

که در آن C_1 و C_2 به‌ترتیب غلظت اولیه بتاکاروتن و غلظت ثانویه بتاکاروتن پس از نگهداری یا تیمار حرارتی است.

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی[1] (SEM)

برای بررسی ساختار میکروسکوپی، دانه‌های برنج به‌صورت عرضی شکسته شدند و با استفاده از نوار کربنی دوطرفه روی یک پایه دایره‌ای قرار داده شد. سپس، با استفاده از دستگاه پوشش‌دهی اسپاتر، روی آن‌ها لایه‌ای نازک از طلا قرار داده شد. سپس ساختار داخلی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (MIRA3, Tescan company, Czech) با ولتاژ ۲ کیلو ولت مشاهده شد (Zhao *et al.*, 2024).

آنالیز آماری

تمامی آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند. آزمون دانکن برای شناسایی اختلافات آماری معنی‌دار ($p<0.05$) بین میانگین‌ها مورد استفاده قرار گرفت، در حالی‌که تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای بررسی تأثیر عوامل مختلف به کار گرفته شد. ارزیابی‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS (version 25, SPSS Inc., USA) انجام شدند.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و پخت برنج ساختاریافته

رطوبت

نتایج نشان داد نمونه‌های برنج ساختاریافته حاوی ژل پرشده امولسیونی از لحاظ میزان رطوبت، تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد (نمونه برنج ساختاریافته فاقد هیدروژل) داشتند ($P<0.05$) (جدول ۱). بیشترین میزان رطوبت در نمونه‌های برنج اکستروژن شده با غلظت‌های ۳۵ درصد ژل پرشده امولسیونی (۷/۱۷ درصد) و ۴۰ درصد ژل پرشده امولسیونی (۶/۹۶ درصد) مشاهده شد که بین این دو سطح اختلاف معنادار آماری وجود نداشت (جدول ۱). همچنین کمترین سطح رطوبت (۶/۲۶ درصد) در برنج اکستروژن شده با سطح ۳۰ درصد ژل پرشده امولسیونی اندازه‌گیری شد. در نتیجه با افزایش سطح ژل پرشده امولسیونی در برنج اکستروژن شده، درصد رطوبت افزایش یافت. صمغ

1- Scanning electron microscopy (SEM)

آلژینات سدیم به‌دلیل تعداد گروه‌های هیدروکسیل بیشتر تمایل زیادی برای ایجاد پیوند با مولکول‌های آب دارد (Yan *et al*., 2023)، هنگامی که به نشاسته هیدراته اضافه می‌شود، فعل و انفعالات الکترواستاتیک بین اتم‌های الکترونگاتیوی بالا (اتم‌های O) در مولکول‌های نشاسته هیدراته و گروه‌های هیدروکسیل صمغ آلژینات سبب ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی می‌شود. این پیوندها در مقایسه با مولکول‌های نشاسته بدون حضور هیدروژل، توانایی بیشتری برای اتصال با مولکول‌های آب دارند و در نهایت سطح رطوبت را افزایش می‌دهند. با توجه به روش اندازه‌گیری رطوبت، میزان آب آزاد موجود در ساختار قابل اندازه‌گیری خواهد (Puspitasari *et al*., 2024). در تحقیق مشابه اثر افزودن دو ترکیب هیدروژلی صمغ گوار و عربی بر ویژگی‌های برنج اکسترودشده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد درصد رطوبت نمونه‌های برنج اکسترود شده حاوی صمغ گوار و عربی حدود ۳۰ درصد نسبت به نمونه‌های بدون صمغ بیشتر بود (Ranjbar, Basiri, Elhamirad, Sharifi, & Chenarbon, 2018).

جدول ۱- اثر غلظت ژل پر شده امولسیونی بر خصوصیات فیزیکومکانیکی برنج کامپوزیت اکسترود شده آرد کینوا-برنج

Table 1- The effect of the emulsion-filled gel concentration on the physico-mechanical properties of extruded rice-quinoa mixed rice

ژل پرشده امولسیونی Emulsion-filled gel (%)	رطوبت Moisture (%)	خاکستر Ash (%)	زمان پخت Optimum preparation time (min)	جذب آب Water absorption (%)	افت پخت Cooking loss (%)	افزایش قد Lateral expansion (%)
Control	2.6 ± 0.02[c]	1.9±0.01[c]	6.5±0.02[c]	233±0.12[b]	12.48±0.03[a]	70±0.15[a]
30 %	6.62±0.07[b]	2.77±0.02[b]	5.5±0.01[c]	245±0.12[b]	12.25±0.03[a]	68.57±0.23[b]
35 %	7.17±0.13[a]	2.88±0.12[b]	7.24±0.02[b]	271±0.31[a]	11.95±0.06[a]	80.48±0.03[a]
40 %	6.96±0.04[a]	3.67±0.03[a]	9.66±0.03[a]	300±0.23 [a]	7.55±0.02[b]	86.26±0.17[a]

میانگین داده‌ها ± انحراف معیار هستند.

* حروف نامشابه در هر ستون (a, b, c)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح (p<۰/۰۵) می‌باشد.

Different superscripts in each column represent a significant difference at P < 0.05. Data are means ± standard deviation.

خاکستر

نتایج نشان داد با افزایش غلظت ژل پرشده امولسیونی، میزان خاکستر نمونه‌های برنج اکستروژن شده افزایش یافت (جدول ۱). بیشترین مقدار خاکستر (۳/۶۷ درصد) در نمونه‌های برنج اکستروژن با سطح ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پرشده امولسیونی و مقادیر خاکستر ۲/۸۸ و۲/۷۷ به‌ترتیب مربوط به غلظت‌های ۳۵ و ۳۰ درصد ژل پرشده امولسیونی بود. کمترین میزان خاکستر نیز در نمونه کنترلی مشاهده شد. سعادت و همکاران (Saadat, Movahhed, & Ahmadi Chenarbon, 2019) گزارش کردند افزایش محتوای خاکستر نمونه های برنج اکستروژن با افزیش صمغ گوار و عربی افزایش یافت (Saadat *et al*., 2019). به‌عبارت دیگر افزایش خاکستر در نتیجه افزایش مواد معدنی ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده ارزش غذایی محصول است. در نتیجه می‌توان گفت افزایش غلظت صمغ، سبب افزایش مواد معدنی و بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای آن شده است (Putri *et al*., 2022).

زمان پخت

زمان پخت نمونه‌های مختلف برنج اکستروژن، براساس مدت زمان مورد نیاز برای نفوذ آب به داخل ساختار، ناپدید شدن مرکز شفاف گرانولی و ایجاد بافت نرم محاسبه شد (جدول ۱). طبق نتایج در نمونه های برنج اکستروژن، بین سطوح مختلف ژل پرشده امولسیونی، اختلاف معنادار آماری وجود داشت (p<۰/۰۵) و بیشترین زمان جهت پخت،۹/۶۶ دقیقه بود که مربوط به نمونه برنج اکستروژن با سطح ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پرشده امولسیونی بود. زمان پخت ارتباط مستقیمی با میزان سختی بافت آن دارد، زیرا هرچقدر بافت متراکم‌تر باشد میزان نفوذ آب به داخل ساختار با سرعت کمتری انجام خواهد شد. گزارش شده وجود لایه‌های متراکم در ساختار بافت دانه‌های برنج سبب افزایش زمان پخت خواهد شد. زیرا مانع از نفوذ آب و انتقال گرما در هنگام پخت به مرکز دانه و با تأخیر در ژلاتیناسیون، زمان پخت را افزایش خواهد داد (Hooper, Bassett, Wiesinger, Glahn, & Cichy, 2023). برای مثال وجود آنزیم سلولاز و زایلاناز در نمونه‌های برنج با هیدرولیز پلی‌ساکاریدهای بافت مانند سلولز، سرعت جذب آب و سرعت انبساط دانه در هنگام پخت را افزایش و در نتیجه زمان پخت را کاهش داده‌اند. در مقابل استفاده از پلی‌ساکاریدی محلول سویا در تیمار برنج اکستروژن، با ایجاد لایه مقاوم بر روی سطح بافت، ژلاتیناسیون را به تأخیر و زمان پخت را افزایش داد (Xiong *et al*., 2023). افزایش غلظت برخی صمغ‌ها به‌دلیل ایجاد پیوند با نشاسته

ساختار ژلی متراکم‌تری ایجاد خواهد کرد و سبب افزایش زمان پخت خواهد شد. در مقابل افزودن برخی از ترکیبات پلی‌ساکاریدی مانند کربوکسی متیل سلولز بدلیل کمک به نفوذ سریعتر آب و حرارت به مرکز هسته دانه برنج، ساختار شفاف گرانولی با سرعت بیشتری از بین خواهد رفت و بافت نرمتری را ایجاد خواهد کرد (Sun *et al*., 2023). در تحقیق مشابه گزارش شده که با افزودن صمغ زانتان میزان زمان پخت کاهش پیدا می‌کند، اما صمغ کربوکسی‌متیل سلولز بر زمان پخت تأثیر معنی‌دار ندارد (Kraithong & Rawdkuen, 2020). همانطور که نتایج بافت سنجی نشان داد، بیشترین سختی در برنج اکستروژن با سطح ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پرشده امولسیونی بود که در نتیجه افزایش ایجاد پیوند نشاسته با بستر آلژینات سدیم اتفاق افتاد. در نتیجه افزایش زمان پخت با افزایش غلظت ژل پرشده امولسیونی را تأیید شد.

جذب آب

همانطور که نتایج حاصل از آزمون جذب آب نمونه‌های برنج اکسترود شده (جدول ۱) نشان می‌دهد، بیشترین مقدار نسبت جذب آب در تیمارهای حاوی ۴۰ درصد ژل پرشده امولسیونی (۳۰۰ درصد) مشاهده گردید در حالی‌که کمترین مقدار مربوط به تیمار با سطح ۳۰ درصد ژل پرشده امولسیونی (۲۷۱ درصد) بود که با تیمار شاهد تفاوت معنادار آماری نداشت (p>۰/۰۵). در نتیجه حضور صمغ‌های آلژینات سدیم میزان جذب آب را در نمونه های اکسترود شده درمقایسه با شاهد افزایش داد. نسبت جذب آب به توانایی دانه‌های برنج برای جذب یا اتصال آب در حین فرآیند پخت برنج مربوط می‌شود. هرچه جذب آب بیشتر باشد، اندازه دانه‌های برنج پخته شده بزرگتر است (Puspitasari *et al*., 2024). نسبت جذب آب یکی از عوامل مهم برای ارزیابی تغییرات فیزیکوشیمیایی نیز می‌باشد، هر چه نسبت جذب آب بیشتر باشد، میزان ژلاتینه شدن آن نیز بیشتر است (Saadat *et al*., 2019). نمونه با سطوح بالاتر ژل پرشده امولسیونی با توجه به درصد بالای هیدروژل در ساختار برنج، اجازه جذب آسان‌تر آب را درماتریکس هیدروکلوئید-نشاسته نسبت به سایر تیمارها فراهم آورد. برهمکنش های بین مولکولی عامل بسیار مهمی در افزایش جذب آب وایجاد پیوندهای هیدروژنی است. ژلاتیناسیون نیز به افزایش جذب آب در مواد غذایی اشاره دارد که در آن عوامل ژل دهنده مانند انواع صمغ‌ها، در نتیجه تشکیل پیوند با مولکول‌های آب سبب ایجاد شبکه ژلی و ساختار متراکم پلیمری در محصول می‌شوند و سبب به دام انداختن مولکول-های آب در ساختار خود می‌شوند (Zhang, Qin, Liang, Hu, & Luan, 2023). محصولات غذایی در فرآیند اکستروژن، تحت فشار و حرارت قرار می‌گیرند که تشکیل شبکه هیدروژلی می‌تواند از تأثیرتنش و ترک‌های برنج جلوگیری کند (Gao *et al*., 2023).

افت پخت

نتایج نشان داد کمترین درصد افت پخت در نمونه برنج اکستروژن شده با سطح ۴۰ درصد (وزنی/وزنی) ژل پرشده امولسیونی (۷/۵۵ درصد) بود (جدول ۱) و با نمونه کنترلی (۱۲/۴۸) اختلاف معنادار آماری داشت (p<0/05). به‌طور کلی جذب رطوبت بالا توسط نشاسته برنج سبب ژلاتیناسیون بیشتر و انتشار بیشترمواد جامد در محیط پخت خواهد شد.

گزارش کردند کاساوا بدلیل این ظرفیت جذب آب بالا، مقدار مولکول‌های آب بیشتری را در طول فرآیند اکستروژن وارد بافت برنج اکسترود شده کرد که در طی فرآیند خشک کردن، سبب ایجاد منافذ بیشتری نیز شد که در نهایت افزایش خروج مواد بیشتری از بافت نیز اتفاق افتاد (Xia, Lin, Wang, Liu, & Liu, 2024). در نتیجه می توان با توجه به نتایج آزمون رطوبت‌سنجی، مقادیربالاتر افت پخت نمونه‌های برنج حاوی ۴۰ و ۳۵ درصد وزنی/وزنی را به جذب آب بیشتر آن‌ها نسبت داد. از سوی دیگر گزارش شده است، صمغ کربوکسی متیل سلولز سبب کاهش افت پخت تا حدود ۰/۱۰ درصد و در مقابل صمغ زانتان سبب افزایش افت پخت تا حدود ۱/۳۱ درصد شد. آن‌ها تأثیر افزودن صمغ‌ها بر کاهش و یا افزایش افت پخت را به زنجیره‌های منشعب پلیمری آن‌ها نسبت دادند که با افزایش جذب آب، سبب رتروگراداسیون بیشتر و افت پخت بیشتر خواهد شد. آنها همچنین گزارش کردند آلژینات-کلسیم به‌عنوان یک پلیمر مناسب با ایجاد پیوند با نشاسته میزان افت پخت را نسبت به سایر انواع صمغ‌ها کاهش داد (Kraithong, Theppawong, Lee, & Huang, 2023). در نتیجه در این تحقیق غلظت بهینه ژل پرشده امولسیونی که دارای بستر پلیمری آلژینات سدیم است نقش مهمی در کاهش افت پخت در برنج اکستروژن شده داشت.

ویژگی‌های رنگی

ویژگی‌های رنگی دانه برنج بر اساس مقادیر شاخص‌های L^*، a^* و b^* محاسبه شد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد (جدول ۲)، تمام نمونه‌های برنج اکسترود شده شامل غلظت‌های مختلف ژل پرشده امولسیونی (۳۵،۳۰ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) شفافیت بالایی داشته و اختلاف معنادار آماری در بین سطوح مختلف قبل و بعد از پخت آنها مشاهده نشد (p>۰/۰۵) اما در مقایسه با نمونه کنترلی (بدون حضور ژل پرشده امولسیونی) اختلاف معنادار آماری داشت (p<۰/۰۵). همچنین نتایج نشان داد که مقادیر شاخص b^* و a^* در بین نمونه‌های برنج اکسترود شده، نمونه با کمترین غلظت ژل پر شده امولسیونی (۳۰ درصد وزنی-وزنی) با نمونه کنترلی در مرحله قبل از پخت اختلاف

معنادار آماری نداشت (p>۰/۰۵) در صورتی‌که با افزایش غلظت ژل پرشده امولسیونی مقدار این دو شاخص افزایش یافته هست. در همه نمونه‌های برنج اکسترود شده بعد از پخت، بین مقادیر پارامتر *b اختلاف معنادار آماری وجود داشت (p<۰/۰۵). یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر رنگ محصولات اکسترود شده دمای مخزن اکسترودر می باشد که باعث ایجاد واکنش‌های مایلارد و کاراملیزاسیون خواهد شد. با توجه به اینکه در این تحقیق از روش اکسترودر سرد استفاده شده، می‌توان عدم تفاوت رنگ بین محصولات و شفافیت بالای نمونه‌های برنج را به آن نسبت داد (Mitra, Pakki, Acharya, & Khanvilkar, 2023). از سوی دیگر گزارش شده هیدروکلوئیدها توزیع آب را در محصول افزایش و در مقابل واکنش‌های مایلارد و کاراملیزاسیون را کاهش می‌دهند که این امر می‌تواند باعث شفافیت بالا در محصول نهایی شود (Naji- Tabasi *et al.*, 2023b). طبق نتایج بیشترین مقدار ΔE در نمونه‌ها بعد از پخت و همچنین در نمونه‌های حاوی ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/ وزنی ژل پرشده امولسیونی است. گزارش شده سطح اولیه رطوبت نمونه اکستروژن شده مقادیر اختلاف رنگ را افزایش خواهد. همچنین واکنش قهوه ای شدن نیز می‌تواند سبب افزایش اختلاف رنگ شود (Basilio-Atencio, Condezo-Hoyos, & Repo-Carrasco-Valencia, 2020). با توجه به سطح بالاتر رطوبت (با توجه به نتایج درصد رطوبت) میزان اختلاف رنگ در نمونه‌های حاوی سطح ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی ژل پرشده امولسیونی بیشتر است. همچنین حرارت پخت می‌تواند سبب ایجاد واکنش‌های قهوه‌ای شدن باشد.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای اختلاف رنگ در نمونه‌های برنج اکستروژن شده با سطوح مختلف ژل پرشده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) قبل و بعد از پخت

Table 2- Color difference parameter values in extruded rice samples with different levels of emulsion-filled gel (30, 35, and 40% w/w) before and after cooking

	قبل از پخت Before cooking				بعد از پخت After cooking			
	Control	**%30**	**35%**	**40%**	**Control**	**30%**	**35%**	**40%**
L*	59.56±0.02[b]	65.18±0.00[a]	68.19±0.00[a]	69.19±0.00[a]	52.95±2.48[c]	62.95±2.48[b]	65.18±4.40[ab]	63.07±1.42[b]
a*	-2.82±0.23[c]	-2.39±1.56[c]	-0.59 ±1.13[a]	-1.17±1.22[b]	0.80±0.02[b]	1.17±0.01[a]	1.17±0.04[a]	1.07±0.10[a]
b*	0.87±0.28[c]	1.15±0.04[b]	1.44±0.09[b]	2.57±0.04[a]	11.58±0.22[b]	12.35±0.12[b]	14.30±2.84[a]	15.08±2.87[a]

* حروف نامشابه در هر ستون (c ,b, a)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح (p<۰/۰۵) می‌باشد.

میانگین داده ها ± انحراف معیار هستند.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means ± standard deviation.

افزایش قد برنج

میزان افزایش قد نمونه‌های برنج اکستروژن شده تحت غلظت های۴۰، ۳۵ و ۳۰ درصد وزنی/وزنی ژل پرشده امولسیونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد (جدول ۱) مقایسه تیمارها با نمونه شاهد نشان داد نمونه های برنج ساختاریافته جدید از لحاظ افزایش قد تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشتند (p>۰/۰۵) (جدول ۱). هیدروکلوئیدها در مرحله ژلاتیناسیون باعث کاهش چگالی ظاهری و کشسانی شده و در مقابل سبب افزایش حجم جانبی و قد دانه‌های برنج خواهند شد. آنها با ایجاد پیوند بین رشته‌های پلیمری می‌توانند سبب حفظ یکپارچگی ساختاری محصول اکستروژن در طول تورم شوند و در نتیجه اندازه نهایی دانه را بیشتر کنند (Awolu, Magoh, & Ojewumi, 2020). افزایش جذب آب درون ساختار برنج اکسترود شده به نرم شدن ساختار آمیلوپکتین و بهبود خواص الاستیک برنج کمک کرده و سبب انبساط جانبی آن خواهد شد. حضور ماده جذب کننده رطوبت مانند صمغ آلژینات سبب تشدید جذب آب و افزایش خاصیت الاستیک نسبت به نمونه برنج اکسترود شده کنترلی می گردد (Saadat *et al.*, 2019). علاوه بر این عوامل دیگری نیز بر انبساط برنج اکسترودشده مؤثر است مانند میزان پروتئین و چربی. پروتئین به توزیع بهتر آب در طول فرآیند اکستروژن کمک می کند و انبساط را کاهش می دهد. چربی نیز به عنوان روان‌کننده عمل و از دانه های نشاسته در برابر ژلاتیناسیون محافظت می‌کند تا ژلاتینه‌شدن آنها و در نتیجه انبساط را کاهش دهد (Becker, Eifert, Soares Junior, Tavares, & Carvalho, 2014). در نتیجه می‌توان گفت با توجه ساختار تشکیل دهنده ژل پر شده امولسیون پیکرینگ حضور بیشتر این مواد در ساختار برنج اکسترود شده نیز افزایش یافته است.

نتایج آزمون بافت سنجی

ویژگی‌های بافتی برنج اکسترود شده با غلظت‌های مختلف ژل پرشده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی/وزنی) قبل و بعد از پخت در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان داد، قبل از پخت افزایش غلظت ژل پر شده امولسیون از ۳۰ تا ۴۰ درصد وزنی/وزنی، به‌طور معناداری سبب افزایش سختی برنج شد (p<۰/۰۵) به‌طوری‌که میزان سختی برنج خام از۲۸۸/۷۰ تا g ۴۳۷/۳۹ افزایش یافت. بیشترین میزان سختی برنج بعد از پخت نیز در غلظت ۴۰ درصد وزنی/ وزنی ژل پرشده امولسیونی و کمترین در برنج اکستروژن شده کنترلی (۵/۰۶) مشاهده شد. همچنین اختلاف معنادار آماری بین سطح ۳۵ و ۴۰ درصد ژل پرشده امولسیونی وجود نداشت (p>۰/۰۵). افزایش سختی در نمونه‌های برنج اکستروژن شده را می‌توان به استحکام شبکه ژلی نشاسته ارتباط دادکه سبب افزایش تراکم در ساختار محصول خواهد شد. در نتیجه ترکیبات ژلی با منبع پلی ساکاریدی، با تأثیر بر ساختار گرانولی نشاسته و کمک به تشکیل شبکه ژلی منسجم، سبب افزایش سختی نهایی در برنج اکسترود شده خواهند شد (Shao et al., 2021; Zheng et al., 2020). نتایج حاصل از سایر تحقیقات نشان داد افزودن پکتین چغندرقند باعث افزایش سختی در برنج اکستروژن شده است. آن‌ها گزارش کردند ترکیب پلی ساکاریدی پکتین با تأثیر بر پیوندهای شبکه ژلی گلوتنین برنج، سبب ایجاد ساختار متراکم و یکنواخت شده که در نهایت سختی برنج را افزایش داده است (Wang, Yang, Li-Sha, & Chen, 2021). به‌طور کلی می‌توان بیان کرد میزان سختی در برنج اکستروژن شده به میزان پیوندهای درون پلیمری ارتباط دارد و ایجاد پیوندهای جدید، شبکه ژلی متراکم و بافت برنج اکستروژن شده سخت‌تر خواهد بود.

نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های بافتی بعد از مرحله پخت برنج اکستروژن شده نشان داد، بین مقادیر چسبندگی بین غلظت‌های مختلف دانه‌های برنج اکستروژن شده با سطح ۴۰، ۳۵ و۳۰ درصد وزنی/وزنی ژل پرشده امولسیونی اختلاف معنادار آماری وجود نداشت (p>۰/۰۵) و بالاترین میزان چسبندگی در نمونه کنترلی مشاهده شد.

پارامتر چسبندگی نقش مهمی در تعیین نرمی و لطافت رشته‌های برنج اکستروژن شده دارد اما چسبندگی بسیار زیاد می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که مواد شسته شده از ساختار دانه‌های برنج[1] در طول پخت تمایل دارند به یکدیگر بچسبند که در نهایت بر طعم نهایی آنها تأثیر گذار خواهد داشت (Castellanos-Gallo et al., 2019). از سوی دیگر طی فرآیند پخت، مولکول‌های نشاسته تمایل دارند با یکدیگر اتصال برقرار کنند و در نتیجه کاهش دما بعد از پخت، شروع به انبساط و ژلاتیناسیون می‌کنند. پلی‌ساکارید با ایجاد پیوند با نشاسته میزان اتصلات بین گرانول‌ها را کاهش داده و سبب تشکیل یک لایه ژل مانند بر روی رشته‌های برنج اکستروژن شده خواهد شد. این لایه تشکیل شده ضمن جلوگیری از رتروگراسیون نشاسته و حفظ رطوبت بالای محصول از چسبندگی نامطلوب دانه‌های برنج به یکدیگر جلوگیری می‌کند (Guan et al., 2023). در نتیجه ژل پرشده امولسیونی اگرچه میزان خروج مواد از ساختار برنج را افزایش داد (با توجه به نتایج افت پخت) اما میزان اتصال و چسبندگی نامطلوب بین دانه‌های برنج را کاهش داده است.

ناجی و همکاران (Naji- Tabasi et al., 2023a) در تحقق مشابه به بررسی پارامترهای کیفی برنج اکسترود شده حاوی هیدروژل های ژلان، زانتان و آلژینات سدیم و مقایسه آن با برنج طبیعی پرداختند. نتایج آزمون بافت‌سنجی آن‌ها تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های برنج حاوی هیدروژل و شاهد برنج از نظر سختی نشان داد. آن‌ها گزارش کردند در میزان آب بالاتر، ژلاتینه شدن نشاسته سریعتر است، که به نوبه خود بافت برنج سخت‌تری ایجاد می کند. دو صمغ ژلان و آلژینات سختی بافت نمونه‌های اکسترودشده را نسبت به شاهد افزایش بیشتری دادند. افزایش درصد هیدروژل در ساختار برنج باعث افزایش سفتی برنج ساختاریافته شد (Naji- Tabasi et al., 2023a).

نتایج ارزیابی حسی

اثر غلظت‌های مختلف ژل پرشده امولسیونی (۴۰، ۳۵ و ۳۰ درصد وزنی/وزنی) بر خصوصیات حسی شامل رنگ، بو، طعم، سفتی، چسبندگی، قابلیت جویدن و پذیرش کلی برنج اکستروژن شده بررسی شد (شکل ۱). از نظر پارامتر رنگی در بین نمونه‌های مختلف اختلاف معنادار آماری وجود نداشت (p > ۰/۰۵). اما از نظر پارامترهای طعم و قابلیت جویدن، کمترین امتیاز به نمونه کنترلی (نمونه بدون ژل پرشده امولسیونی) داده شد. در نهایت بالاترین پارامتر برای پذیرش کلی مربوط به نمونه ۴۰ درصد و بعد از آن به نمونه ۳۵ درصد ژل پرشده امولسیونی تعلق داشت. از سوی دیگر به‌دلیل ساختار متراکم برنج اکستروژن در غلظت۴۰ درصد وزنی/ وزنی ژل پرشده امولسیونی، خروج مواد جامد در هنگام پخت در آن کمتر و در نتیجه از نظر پارامتر نامطلوب چسبندگی پایین سطح را داشت. تحقیقات نشان داده است آرد کینوا در ساختارمحصول اکسترود یافته، بافت متراکم‌تر و فشرده‌تری را نسبت به آرد برنج ایجاد می‌کند که سبب کاهش نفوذ مولکول‌های آب، انبساط کمتر و شفافیت کمتر (شاخص رنگ) در محصول می‌شود (Alaji, Hymavathi, Robert, & Deepika, 2018). کربوهیدرات‌ها با ایجاد بافت دهانی مطلوب و اثر پوشانندگی بر طعم نامطلوبی که در فرآیند اکستروژن ممکن است ایجاد شود، میزان پذیرش کلی محصولات

1- leached materials

اکستروژن شده را افزایش خواهند داد. همچنین با تأثیر بر ساختار و ایجاد بافت یکنواخت قابلیت جویدن را بهبود خواهد بخشید (Qi *et al.*, 2023). ناجی و همکاران (Naji- Tabasi *et al.*, 2023b) گزارش داد که که صمغ‌های ژلان، آلژینات سدیم و زانتان باعث بهبود احساس دهانی نشاسته برنج اکستروژن در مقایسه با نمونه بدون تیمار شدند. براساس نتایج بدست آمده بیشترین امتیاز حسی مربوط به نمونه با سطح ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی بود.

جدول ۳- ویژگی‌های بافتی نمونه‌های برنج حاوی مقادیر مختلف ژل پرشده امولسیونی (با بستر ژلی آلژینات سدیم (غلظت ٤ درصد وزنی/وزنی) و نسبت ۱۵درصد حجمی/حجمی امولسیون پیکرینگ در بستر ژلی پرشده امولسیونی)

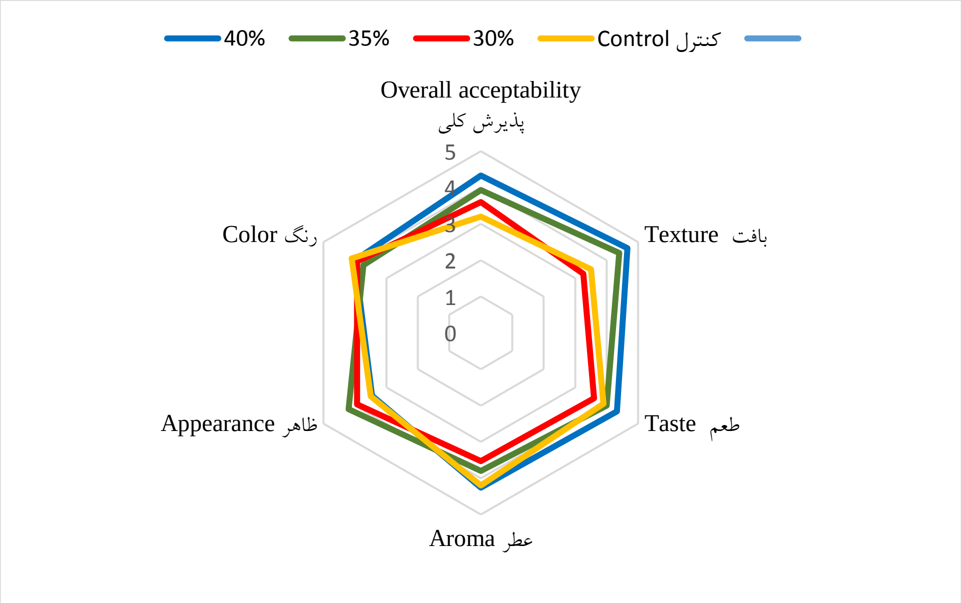
Table 3- Textural properties of rice samples containing different concentration of emulsion-filled gel (with sodium alginate gel matrix (4% w/w) and a 15% volume/volume ratio of Pickering emulsion in the emulsion-filled gel matrix)

	قبل از پخت Before cooking	بعد از پخت After cooking	
غلظت ژل پرشده امولسیونی Emulsion-filled gel (%)	سختی Hardness (g)	سختی Hardness (g)	چسبندگی Adhesiveness (g.s)
40	437.39±31.35[a]	9.52±0.19[a]	0.55±0.01[b]
35	367.80±17.93[b]	8.50±1.00[a]	0.55±0.05[b]
30	288.70±26.58[a]	6.98±0.74[b]	0.55±0.19[b]
Control	256.70±12.32[a]	5.06±0.23[b]	0.63±0.19[a]

* میانگین ± انحراف استاندارد.

** حروف نامشابه در هر ستون (c ,b, a)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در بر اساس آزمون دانکن (p<۰/۰۵) می‌باشد.

Different superscripts in each column represent a significant difference at $P < 0.05$. Data are means ± standard deviation.



(Meng, Sun, MU, & Garcia-Vaquero, 2024)

شکل ۱- ارزیابی حسی نمونه‌های برنج اکسترود شده حاوی مقادیر مختلف ژل پرشده امولسیونی

(بستر ژلی با غلظت ۴ درصد وزنی-وزنی سدیم آلژینات و امولسیون پیکرینگ ۱۵ درصد حجمی/حجمی حامل بتاکاروتن با غلظت ۰/۱ درصد)

Fig. 1. Sensory evaluation of extruded rice samples containing different amounts of emulsion-filled gel (Gel matrix with 4% w/w sodium alginate concentration and 15% v/v Pickering emulsion carrier of beta-carotene with 0.1% concentration)

پایداری بتاکاروتن در برنج اکسترود شده مخلوط آرد کینوا- برنج در طی دوره نگهداری و پخت

پس از بررسی نتایج آزمون‌های قبلی، نمونه برنج اکسترود شده با ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی به‌عنوان نمونه منتخب مورد بررسی و از نظر پایداری بتاکاروتن با نمونه برنجی که حاوی بتاکاروتن بدون پوشش بود، طی دوره نگهداری و همچنین پس از پخت مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد میزان پایداری بتاکاروتن در نمونه حاوی ژل پر شده امولسیونی در مقایسه با نمونه‌ای که بتاکاروتن به‌طور مستقیم به برنج اضافه شده است، به‌طور معناداری پایداری بیشتری دارد (p<۰/۰۵) (جدول ۴).

سیستم‌های انکپسولاسیون در سامانه‌های غذایی، عموما با هدف حفظ پایداری ترکیبات مغذی در طی فرآیندهای حرارتی یا دوره نگهداری، طراحی می‌شوند (Wei *et al.*, 2022). تشکیل شبکه ژلی آلژینات سدیم، به‌عنوان یک پوشش محافظ، قطرات امولسیون را در خود محصور و از اکسیداسیون و تجزیه بتاکاروتن در اثر عوامل محیطی مانند نور، گرما و اکسیژن جلوگیری می کند (Geng *et al.*, 2022). بستر ژلی آلژینات سدیم با ایجاد پیوندهای غیرکووالانت با ذرات جامد موجود در سطح قطرات روغن (نانوذرات پروتئین آب پنیر-صمغ شاهی)، سبب ایجاد شبکه ژلی قوی می‌شود. افزایش این پیوندهای عرضی سبب کاهش تحرکات قطرات روغن و در نهایت بافزایش پایداری سامانه امولسیون پیکرینگ می‌شوند (Lv, Zhang, Chen, & Yin, 2022; Zhang *et al.*, 2023).

به‌طور کلی، افزایش بار سطحی و کاهش اندازه ذرات پیکرینگ امولسیون به حفظ پایداری آن در برابر عوامل محیطی و در نتیجه حفظ ترکیب مغذی کمک می‌کند (Meng *et al.*, 2024). صمغ شاهی یک پلی ساکارید با بار منفی هست که در محدوده زیادی از دما می‌تواند پایدار باشد و به‌عنوان یک ترکیب امولسیفایری در پایداری سامانه امولسیونی به کار برده شود (Davtalab *et al.*, 2024). از سوی دیگر، تشکیل پیوند بین گروه‌های کربوکسیل آلژینات سدیم، به‌عنوان یک پلی‌ساکارید با بار منفی، با نانوذرات پروتئین آب پنیر-صمغ شاهی دافعه‌ی الکترواستاتیک بین قطرات و بار سطحی سامانه را افزایش می دهد. مکانیسم دافعه الکترواستاتیک در نهایت سبب جلوگیری از افزایش اندازه قطرات امولسیون می‌شود (Cai, Zhang, & Xie, 2024; Xin Liu *et al.*, 2023). در نتیجه، می‌توان گفت ژل پرشده امولسیونی توانسته است ترکیب مغذی بتاکاروتن را در برنج اکسترود شده طی پخت و دوره نگهداری حفظ کند. در مقابل در نمونه بدون ژل پر شده امولسیونی، به‌دلیل افزایش سطح تماس بتاکاروتن با اکسیژن، اکسیداسیون آن سریع‌تر رخ داد و مقاومت آن در برابر حرارت بسیار کمتر بود.

جدول ٤- بررسی پایداری بتاکاروتن در برنج اکسترود شده مخلوط آرد کینوا- برنج در طی دوره نگهداری و بعد از پخت

Table 4- Investigation of β-carotene stability in extruded rice mixed with quinoa-rice flour during storage and after cooking

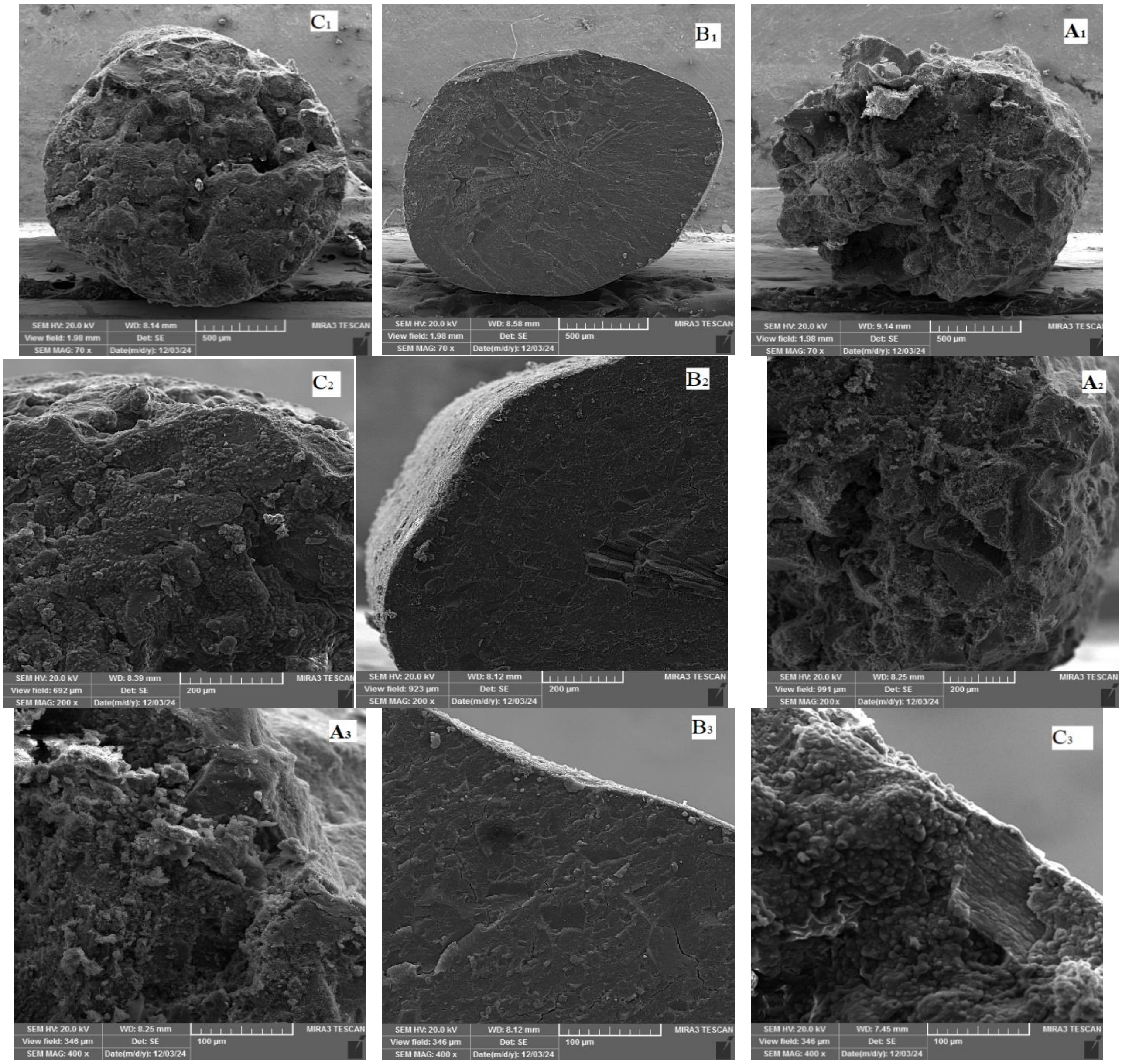
نمونه حاوی بتاکاروتن Sample containing beta-carotene	طی دوره نگهداری Storage stability (1 month)	پس از پخت After cooking
برنج اکسترود شده با ژل پرشده امولسیونی (۴۰ درصد) Extruded rice filled with emulsion gel (40%0	91.10 ± 0.43[a]	87.32 ± 2.03[a]
برنج اکسترود شده بدون ژل پرشده امولسیونی Extruded rice without Emulsion-gel	86.07 ± 0.32[b]	47.21 ± 0.26[b]

میانگین داده ها ± انحراف معیار هستند. حروف نامشابه در هر ستون (a ,b ,c)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح (p<۰/۰۵) می‌باشد.

Different superscripts in each column represent a significant difference at P < 0.05. Data are means ± standard deviation.

تصاویر میکروسکوپی الکترونیکی روبشی (SEM)

نتایج SEM نشان داد که برنج طبیعی در مقایسه با برنج اکسترود شده مخلوط آرد کینوا-برنج دارای پوسته‌ای بسیار سخت‌تر بود و در مقایسه بین دو نمونه برنج اکسترود شده، نمونه برنج بدون حضور هیدروژل ساختاری نسبتا سست مشاهده شد. با افزودن ژل پرشده امولسیونی، ساختار برنج اکسترود شده پوسته سفت‌تری از خود نشان داد و ساختار داخلی آن منسجم‌تر شد (شکل ۲ (A1-C1)). افزودن فیبر گیاهی در ساختار برنج اکسترود شده، باعث می‌شود ساختار بلوری دانه‌های نشاسته برنج با یکدیگر برهمکنش کمتری داشته باشند و متعاقبا در مقایسه با برنج طبیعی، ساختار بلوری نیز کاهش یابد. از سوی دیگر با افزودن یک ترکیب ماکرومولکولی که بتواند پراکندگی دانه‌های نشاسته کوچک را تسهیل می‌کند، باعث می‌شود دانه‌های نشاسته در طول فرآیند اکستروژن همگن‌تر و منسجم‌تر شوند (Liu *et al.*, 2018). در نتیجه می‌توان گفت حضور آرد کینوا به‌عنوان ترکیب جدید سبب کاهش برهمکنش‌های نشاسته‌ای آرد برنج شده است و در مقایسه با نمونه طبیعی سختی کمتری دارد. در مقابل حضورهیدروژل و تشکیل شبکه، سبب شده بافت برنج اکسترود شده منسجم‌تر گردد.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های برنج اکسترودشده بدون ژل پرشده امولسیونی (A)، نمونه برنج هاشمی (B) و برنج اکسترودشده حاوی ٤٠ درصد ژل پر شده امولسیونی (C)

Fig. 2. SEM images of extruded rice without emulsion -filled gel (A), Hashemi rice grain(B) and extruded rice with 40% emulsion filled gel (C)

مقایسه نمونه منتخب با نمونه برنج واریته هاشمی

برای توسعه برنج اکسترودشده حاوی ژل پرشده امولسیونی به عنوان جایگزینی برای برنج طبیعی، نمونه انتخاب شده (۴۰ درصد ژل پرشده امولسیونی) انتخاب و با برنج هاشمی مقایسه شدند. با توجه به نتایج جدول ۵، از نظر ویژگی‌های پخت، نمونه‌های برنج مخلوط زمان پخت کمتری داشتند که به‌دلیل تخریب ساختار نشاسته است (جدول ۵). نسبت جذب آب در برنج مخلوط حاوی ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی (۳۰۰ درصد) بیشتر از برنج هاشمی (۲۰۱ درصد) بود که می‌توان به افزایش جذب آب بیشتر توسط ژل نسبت داد (جدول ۵). از نظر میزان افت پخت، تفاوت معنی‌دار آماری بین نمونه‌های برنج اکسترود شده در مقایسه با برنج هاشمی (۹/۲۱ درصد) وجود داشت ($p<0.05$). ویژگی افزایش قد نمونه‌های برنج هاشمی پس از پخت مشابه دانه‌های برنج اکسترود شده بود.

جدول ٥- ویژگی‌های پخت و رنگی برنج منتخب و برنج هاشمی

Table 5- Cooking and color properties of optimum extruded rice and Hashemi rice

ویژگی نمونه برنج Rice properties	برنج حاوی ٤٠ درصد ژل پر شده امولسیونی Emulsion-filled gel -rice% 40	برنج هاشمی Hashemi rice
Cooking time (min) زمان پخت	9.66 ± 0.03[b]	15.00 ± 2.49[a]
Water absorption ratio (%) درصد جذب آب	300 ± 0.23[a]	201.50 ± 8.59[b]
Cooking loss (%) افت پخت	7.55 ± 0.02[b]	9.21 ± 1.16[a]
Lateral expansion (%) افزایش قد	86.26 ± 0.17[a]	80.43 ± 2.23[a]

* حروف نامشابه در هر ردیف، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح (p<۰/۰۵) می‌باشد.

میانگین داده ها ± انحراف معیار هستند.

Different superscripts in each row represent a significant difference at P < 0.05. Data are means ± standard deviation.

برنج هاشمی سختی بیشتری از نمونه‌های برنج اکسترود شده داشت (جدول ۶). برنج کامپوزیت اکسترود شده حاوی ۴۰ درصد ژل پرشده امولسیونی دارای مقدار سختی کمتری نسبت به برنج هاشمی (g ۱۴/۶۵) بود. از سوی دیگر تفاوت معنادار آماری بین میزان چسبندگی بعد از پخت در برنج هاشمی (g.s ۰/۳۶) با نمونه برنج کامپوزیت اکسترود شده وجود نداشت (p>۰/۰۵). مهمترین عامل تأثیرگذار بر بافت محصول و میزان سختی آن، جذب آب می‌باشد. گزارش شده در اسنک تهیه شده از آرد کینوا، با افزایش جذب آب تحت تیمارهای مختلف، میزان سختی آن کاهش یافته است. همچنین شرایط پخت با تبخیرآب از محصول خواص بافتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و میزان سختی محصول را کاهش می‌دهد (Muñoz-Pabon, Roa-Acosta, Hoyos-Concha, Bravo-Gómez, & Ortiz-Gómez, 2022). از سوی دیگر حضور هیدروژل در محصول اکسترود شده نسبت به نمونه طبیعی برنج سبب افزایش جذب آب و کاهش سختی آن شده است (Naji- Tabasi *et al*., 2023a).

نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین ویژگی‌های حسی نمونه‌های بهینه برنج کامپوزیت اکسترود شده و برنج هاشمی وجود ندارد (شکل ۳). نتایج نشان داد که برنج اکسترود شده حاوی ۴۰ درصد ژل پرشده امولسیونی می‌تواند جایگزین مناسبی برای برنج هاشمی باشد. ژل‌های امولسیونی دارای خواص بافتی و رئولوژیکی خاصی هستند که درک حسی بیشتری را فراهم می‌کنند. پوشش‌دهی بتاکاروتن با ژل‌های امولسیونی می‌تواند کاربردهای بتاکاروتن را در صنعت غذا گسترش دهد (Geng *et al*., 2022). یک ژل امولسیونی با ساختار پیچیده می‌تواند به گونه‌ای طراحی شود که به آرامی و یا به سرعت توسط آنزیم‌های گوارشی تجزیه شود. این نوع امولسیون می‌تواند برای تحویل هدفمند مواد مغذی به بدن مفید باشد (Golding & Wooster, 2010).

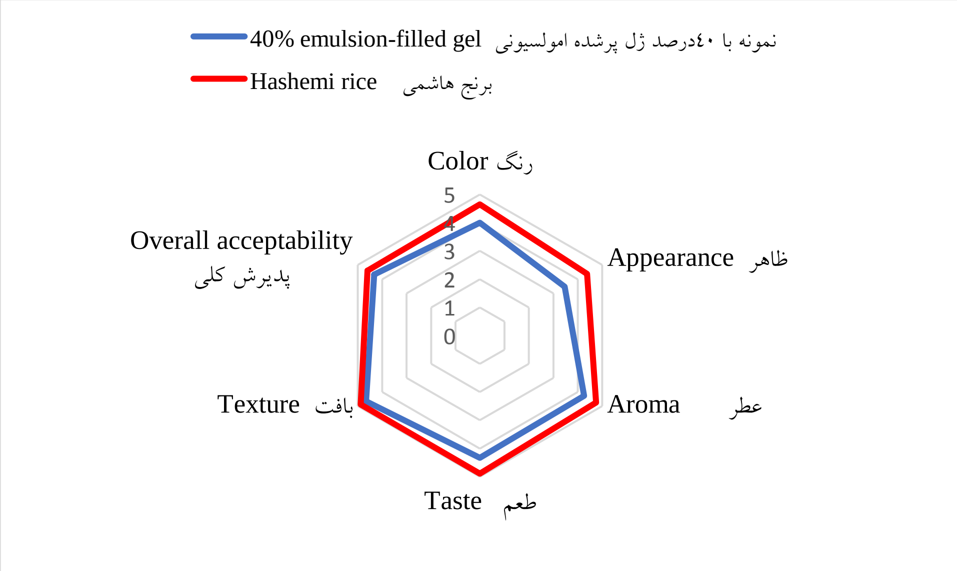
جدول ٦- ویژگی بافتی برنج کامپوزیت اکسترود شده بهینه با برنج واریته هاشمی قبل و بعد از پخت

Table 6- Textural properties of optimum extruded rice and Hashemi rice before and after cooking

نوع نمونه برنج Rice sample	قبل از پخت Before cooking	بعد از پخت After cooking	
	سختی Hardness (g)	سختی Hardness (g)	چسبندگی Adhesiveness (g.s)
حاوی ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی 40% emulsion-filled gel	437.39±31.35[b]	9.52±0.19[b]	0.55±0.01[a]
برنج هاشمی Hashemi rice	633.89±22.45[a]	14.65±1.30[a]	0.36±0.44[a]

میانگین داده ها ± انحراف معیار هستند. * حروف نامشابه در هر ستون (c ,b, a)، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در سطح (p<۰/۰۵) می‌باشد.

Different superscripts in each column represent a significant difference at P < 0.05. Data are means ± standard deviation.



شکل ۳- بررسی خواص حسی برنج اکسترود شده مخلوط آرد کینوا-برنج با نمونه برنجی طبیعی واریته هاشمی

Fig. 3. Sensory properties evaluation of extruded rice mixed with quinoa-rice flour compared to natural rice (Hashemi variety)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور بهبود خصوصیات فیزیکومکانیکی برنج کامپوزیت اکسترود شده مخلوط آرد کینوا-برنج، از ژل پرشده امولسیون پیکرینگ که حاوی ترکیب مغذی بتاکاروتن بود، استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش غلظت ژل پرشده امولسیونی (۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد وزنی-وزنی) میزان رطوبت، خاکستر، افزایش قد و زمان پخت برنج ساختار یافته افزایش و در مقایسه با نمونه کنترلی بیشتر بود. با افزایش ژل پر شده امولسیونی کاهش چسبندگی و افزایش سختی در نمونه‌های برنج اکسترود شده مشاهده شد به‌طوری‌که بیشترین چسبندگی و کمترین سختی مربوط به نمونه کنترلی بود. افزایش غلظت ژل پرشده امولسیونی تا سطح ۴۰ درصد وزنی-وزنی، میزان روشنایی دانه‌های برنج را نسبت به نمونه کنترلی افزایش داده است. از لحاظ ویژگی‌های حسی سطح ۴۰ درصد ژل پر شده امولسیونی بیشترین امتیاز را دارا بود. با توجه به نتایج این تحقیق، افزایش غلظت ژل پرشده امولسیونی سبب بهبود خواص فیزیکومکانیکی محصول برنج شد. بنابراین می‌توان محصول برنج اکسترودشده مخلوط آرد کینوا-برنج با سطح ۴۰ درصد ژل پرشده امولسیونی را به‌عنوان محصولی پیشنهاد داد که ضمن غنی‌شدن با ترکیب مغذی بتاکاروتن، دارای اثرات سلامتی بخش آرد کینوا نیز می‌باشد. مقایسه نمونه برنج بهینه اکسترودشده مخلوط آرد کینوا- برنج با برنج طبیعی نشان داد، نمونه اکسترود شده به‌دلیل نزدیک بود خواص حسی به نمونه طبیعی می‌تواند جایگرین مناسبی برای برنج طبیعی باشد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند هیچ تعارض منافعی ندارند.

میزان مشارکت نویسندگان

مریم داوطلب: انجام آزمایشات، تحقیق و بررسی، مدیریت داده، نوشتن پیش‌نویس اصلی، **سارا ناجی طبسی**: مدیریت پروژه، نظارت، نوشتن- بررسی و ویرایش، **مصطفی شهیدی نوقابی**: نظارت، نوشتن- بررسی و ویرایش.

منابع تأمین مالی

این مقاله توسط مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی حمایت مالی شده است که بدینوسیله از آنها قدردانی می‌شود.

References

1. Alajil, O., Hymavathi, T., Robert, P., & Deepika, L. (2018). Effect of flour composition and temperature on physico-chemical and sensory properties of quinoa based extrudates. *Journal of Pharmaceutical Research International, 24*(5), 1-13. https://doi.org/10.9734/JPRI/2018/45346
2. Awolu, O.O., Magoh, A.O., & Ojewumi, M.E. (2020). Development and evaluation of extruded ready-to-eat snack from optimized rice, kersting's groundnut and lemon pomace composite flours. *Journal of Food Science and Technology, 57*, 86-95. https://doi.org/10.1007/s13197-019-04033-9
3. Basilio-Atencio, J., Condezo-Hoyos, L., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2020). Effect of extrusion cooking on the physical-chemical properties of whole kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) flour variety centenario: Process optimization. *LWT, 128*, 109426. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109426
4. Becker, F.S., Eifert, E.D.C., Soares Junior, M.S., Tavares, J.-A.S., & Carvalho, A.V. (2014). Physical and functional evaluation of extruded flours obtained from different rice genotypes. *Ciência e Agrotecnologia, 38*, 367-374. https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000400007
5. Bouasla, A., & Wójtowicz, A. (2021). Gluten-free rice instant pasta: Effect of extrusion-cooking parameters on selected quality attributes and microstructure. *Processes*, *9*(4), 693. https://doi.org/10.3390/pr9040693
6. Buyukkestelli, H.I., & El, S.N. (2019). Development and characterization of double emulsion to encapsulate iron. *Journal of Food Engineering, 263*, 446-453. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.026
7. Cai, J., Zhang, D., & Xie, F. (2024). The role of alginate in starch nanocrystals-stabilized Pickering emulsions: From physical stability and microstructure to rheology behavior. *Food Chemistry*, *431*, 137017. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137017
8. Castellanos-Gallo, L., Galicia-García, T., Estrada-Moreno, I., Mendoza-Duarte, M., Márquez-Meléndez, R., Portillo-Arroyo, B., & Sanchez-Aldana, D. (2019). Development of an expanded snack of rice starch enriched with amaranth by extrusion process. *Molecules*, *24*(13), 2430. https://doi.org/10.3390/molecules24132430
9. Committee, A.A.O.C.C.A.M. (2000). *Approved methods of the American association of cereal chemists*.
10. Davtalab, M., Naji-Tabasi, S., Shahidi-Noghabi, M., Martins, A.J., Bourbon, A.I., & Cerqueira, M.A. (2024). Pickering emulsion stabilized by different concentrations of whey protein–cress seed gum nanoparticles. *Foods*, *13*(23), 3777. https://doi.org/10.3390/foods13233777
11. Farjami, T., & Madadlou, A. (2019). An overview on preparation of emulsion-filled gels and emulsion particulate gels. *Trends in Food Science & Technology*. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.043
12. Gao, L., Xu, Z., Zhang, R., Qin, Y., Ji, N., Wang, Y., & Sun, Q. (2023). Effects of erythritol on rheological properties of rice flour and structural characteristics of extruded dried rice noodles with rapid rehydration behaviors. *Food Hydrocolloids*, 109007. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109007
13. Geng, M., Wang, Z., Qin, L., Taha, A., Du, L., Xu, X., & Hu, H. (2022). Effect of ultrasound and coagulant types on properties of β-carotene bulk emulsion gels stabilized by soy protein. *Food Hydrocolloids*, *123*, 107146. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107146
14. Godoy, R. (2015). Quinoa and rice co-products gluten free-cereals: Physical, chemical, microbiological and sensory qualities.
15. Golding, M., & Wooster, T.J. (2010). The influence of emulsion structure and stability on lipid digestion. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *15*(1-2), 90-101. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.11.006
16. Guan, C., Liu, J., Gan, S., Xiong, G., Qiao, F., Mo, W., & Lin, Q. (2023). Effects of soluble soybean polysaccharide on cooking and eating quality of dry rice noodles under single-and twin-screw extrusions. *LWT*, *187*, 115352. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115352
17. Hooper, S.D., Bassett, A., Wiesinger, J.A., Glahn, R.P., & Cichy, K.A. (2023). Extrusion and drying temperatures enhance sensory profile and iron bioavailability of dry bean pasta. *Food Chemistry Advances*, *3*, 100422. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100422
18. Iqbal, S., Chen, X.D., Kirk, T.V., & Huang, H. (2020). Controlling the rheological properties of W1/O/W2 multiple emulsions using osmotic swelling: Impact of WPI-pectin gelation in the internal and external aqueous phases. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *185*, 110629. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110629
19. Kraithong, S., & Rawdkuen, S. (2020). Effects of food hydrocolloids on quality attributes of extruded red Jasmine rice noodle. *PeerJ*, *8*, e10235. https://doi.org/10.7717/peerj.10235
20. Kraithong, S., Theppawong, A., Lee, S., & Huang, R. (2023). Understanding of hydrocolloid functions for enhancing the physicochemical features of rice flour and noodles. *Food Hydrocolloids*, 108821. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108821
21. Lim, H.-P., Ho, K.-W., Singh, C.K.S., Ooi, C.-W., Tey, B.-T., & Chan, E.-S. (2020). Pickering emulsion hydrogel as a promising food delivery system: Synergistic effects of chitosan Pickering emulsifier and alginate matrix on

hydrogel stability and emulsion delivery. *Food Hydrocolloids*, 105659. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105659

22. Liu, X., Zhao, J., Zhang, X., Li, Y., Zhao, J., Li, T., & Qiao, L. (2018). Enrichment of soybean dietary fiber and protein fortified rice grain by dry flour extrusion cooking: The physicochemical, pasting, taste, palatability, cooking and starch digestibility properties. *RSC Advances, 8*(47), 26682-26690. https://doi.org/10.1039/C8RA01781F
23. Lv, D., Zhang, P., Chen, F., & Yin, L. (2022). Effects of emulsion concentration on the physicochemical properties of wheat bran arabinoxylan-soy protein isolate emulsion-filled gels used as β-carotene carriers. *Lwt, 153*, 112498. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112498
24. Meng, W., Sun, H., MU, T.-H., & Garcia-Vaquero, M. (2024). Exploring pickering emulsions stabilized by chitosan and multiple seaweed polyphenols for an efficient protection and delivery of β-Carotene. *ACS Food Science & Technology, 4*(5), 1287-1300. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00178
25. Miazek, K., Beton, K., Śliwińska, A., & Brożek-Płuska, B. (2022). The effect of β-carotene, tocopherols and ascorbic acid as anti-oxidant molecules on human and animal in vitro/in vivo studies: A review of research design and analytical techniques used. *Biomolecules, 12*(8), 1087. https://doi.org/10.3390/biom12081087
26. Mirzaei, M., Movahhed, S., Asadollahzadeh, M.J., & Ahmadi Chenarbon, H. (2021). Effect of carboxymethylcellulose and locust bean gums on some of physicochemical, mechanical, and textural properties of extruded rice. *Journal of Texture Studies, 52*(1), 91-100. https://doi.org/10.1111/jtxs.12563
27. Mitra, P., Pakki, S.M., Acharya, B., & Khanvilkar, S. (2023). Optimization of single screw extrusion processing variables and soy and rice flour blend formulations based on physical properties of extrudates. *Current Chinese Science, 3*(4), 263-274. https://doi.org/10.2174/2210298103666230203121700
28. Muñoz-Pabon, K.S., Roa-Acosta, D.F., Hoyos-Concha, J.L., Bravo-Gómez, J.E., & Ortiz-Gómez, V. (2022). Quinoa snack production at an industrial level: effect of extrusion and baking on digestibility, bioactive, rheological, and physical properties. *Foods, 11*(21), 3383. https://doi.org/10.3390/foods11213383
29. Naji- Tabasi, S., Shahidi- Noghabi, M., Modiri Dovom, A., & Davtalab, M. (2023a). The use of hydrogel structures in production of extruded rice and investigation of its qualitative characteristics. *Food Science Nutrient, 11*(10), 5873-5881. https://doi.org/10.1002/fsn3.3466
30. Naji- Tabasi, S., Shahidi- Noghabi, M., Modiri Dovom, A., & Davtalab, M. (2023b). The use of hydrogel structures in production of extruded rice and investigation of its qualitative characteristics. *Food Science & Nutrition*. https://doi.org/10.1002/fsn3.3466
31. Naji, S., Razavi, S.M., & Karazhiyan, H. (2012). Effect of thermal treatments on functional properties of cress seed (*Lepidium sativum*) and xanthan gums: A comparative study. *Food Hydrocolloids, 28*(1), 75-81. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.11.012
32. Nourbehesht, N., Shekarchizadeh, H., & Soltanizadeh, N. (2018). Investigation of stability, consistency, and oil oxidation of emulsion filled gel prepared by inulin and rice bran oil using ultrasonic radiation. *Ultrasonics Sonochemistry, 42*, 585-593. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.029
33. Puspitasari, D.A., Pudjianto, K., Darussalam, A., Wicaksana, G.H., & Hastuti, H.P. (2024). The effect of sodium tripolyphosphate and guar gum on physical characteristics of analog rice from Gaplek flour. *AgriTECH, 44*(2), 153-160. https://doi.org/10.22146/agritech.78300
34. Putri, R., Rohmah, K., Lestari, I., Bahlawan, Z., Astuti, W., Kusumaningrum, M., & Purwanti, D. (2022). *Physical characteristics and nutritional value of cassava analogue rice with fortified protein tempeh and the addition of xanthan gum for healthy dieters.* Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. https://doi.org/10.1088/1755-1315/969/1/012036
35. Qadir, N., & Wani, I.A. (2023). Functional properties, antioxidant activity and in-vitro digestibility characteristics of brown and polished rice flours of Indian temperate region. *Grain & Oil Science and Technology, 6*(1), 43-57. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.12.001
36. Qi, W., Ma, C.M., Xing, W.J., Fan, J., Yang, Y., Yang, C.H., & Zhang, N. (2023). Effects of extrusion on physical properties of glutinous rice and its application in the improvement of quality characteristics of glutinous rice products. *Journal of Food Science*. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16683
37. Radu, G.L., Litescu, S.C., Albu, C., Teodor, E., & Truica, G. (2012). Beta-carotene and lycopene determination in new enriched bakery products by HPLC-DAD method. *Romanian Biotechnological Letters, 17*(1), 7006.
38. Ranjbar, S., Basiri, A., Elhamirad, A.H., Sharifi, A., & Chenarbon, H.A. (2018). Effect of hydrocolloids on physicochemical, sensory and textural properties of reconstructed rice grain by extrusion cooking technology. *Journal of Food Measurement and Characterization, 12*(3), 1622-1632. https://doi.org/10.1007/s11694-018-9777-5

39. Rehman, A., Ahmad, T., Aadil, R.M., Spotti, M.J., Bakry, AM., Khan, I.M., & Tong, Q. (2019). Pectin polymers as wall materials for the nano-encapsulation of bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology*. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.015
40. Rostamabadi, H., Falsafi, S.R., & Jafari, S.M. (2019). Nanoencapsulation of carotenoids within lipid-based nanocarriers. *Journal of Controlled Release*. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.02.005
41. Saadat, S., Movahhed, S., & Ahmadi Chenarbon, H. (2019). Effect of guar and arabic gums on qualitative properties of extruded rice. *Journal of Food Process Engineering*, *42*(2), e12959. https://doi.org/10.1111/jfpe.12959
42. Semenova, M. (2017). Protein–polysaccharide associative interactions in the design of tailor-made colloidal particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *28*, 15-21. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2016.12.003
43. Seo, Y., Moon, Y., & Kweon, M. (2021). Effect of purple-colored wheat bran addition on quality and antioxidant property of bread and optimization of bread-making conditions. *Applied Sciences*, *11*(9), 4034. https://doi.org/10.3390/app11094034
44. Shao, Z., Han, J., Wang, J., Sun, Y., Li, X., & Liang, J. (2021). Process optimization, digestibility and antioxidant activity of extruded rice with Agaricus bisporus. *LWT*, *152*, 112350. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112350
45. Sumardiono, S., Kusumayanti, H., Prakoso, N.I.A., Paundrianagari, F.P., & Cahyono, H. (2021). Influence of composite flour constituents and extrusion temperature in the production of analog rice. *Food Sci Nutr*, *9*(8), 4385-4393. https://doi.org/10.1002/fsn3.2411
46. Sun, Z., Lyu, Q., Zhuang, K., Chen, L., Wang, G., Wang, Y., &Ding, W. (2023). Impact of different preparation methods on the properties of brown rice flour and the cooking stability of brown rice noodles and the underlying mechanism: Microstructure, starch-protein distribution, moisture migration. *LWT*, *181*, 114697. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114697
47. Taheri, A., & Jafari, S.M. (2019). Nanostructures of gums for encapsulation of food ingredients. In *Biopolymer Nanostructures for Food Encapsulation Purposes* (pp. 521-578): Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815663-6.00018-5
48. Tangjaidee, P., Xiang, J., Yin, H., Wen, X., & Quek, S.Y. (2019). Selenium, fibre, and protein enrichment of rice product: extrusion variables and product properties. *Food quality and Safety*, *3*(1), 40-51. https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy028
49. Torres, O.L., Lema, M., & Galeano, Y.V. (2021). Effect of using quinoa flour (*Chenopodium quinoa* Willd.) on the physicochemical characteristics of an extruded pasta. *International Journal of Food Science*, *2021*(1), 8813354. https://doi.org/10.1155/2021/8813354
50. Wang, X., Zeng, M., Yu, Y.-H., Wang, H., Mannan, M.S., & Cheng, Z. (2017). Thermosensitive ZrP-PNIPAM Pickering emulsifier and the controlled-release behavior. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *9*(8), 7852-7858. https://doi.org/10.1021/acsami.6b16690
51. Wang, Y.-R., Yang, Q., Li-Sha, Y.-J., & Chen, H.-Q. (2021). Structural, gelation properties and microstructure of rice glutelin/sugar beet pectin composite gels: Effects of ionic strengths. *Food Chemistry*, *346*, 128956. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128956
52. Waterhouse, G.I., & Sun-Waterhouse, D. (2019). Encapsulation systems containing multi-nutrients/bioactives: From molecular scale to industrial scale. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21511-4
53. Wei, Y., Wang, C., Liu, X., Mackie, A., Zhang, M., Dai, L., & Gao, Y. (2022). Co-encapsulation of curcumin and β-carotene in Pickering emulsions stabilized by complex nanoparticles: Effects of microfluidization and thermal treatment. *Food Hydrocolloids*, *122*, 107064. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107064
54. Xia, W., Lin, Y., Wang, F., Liu, Y., & Liu, R.H. (2024). Preparation and physicochemical properties: a new extruded rice using cassava starch and broken rice flour. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *8*, 1383012. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1383012
55. Xiong, G., Jia, L., Luo, L., Ding, Y., Lin, Q., & Liu, C. (2023). Improvement in texture and cooking quality of black rice (*Oryza sativa* L.) using different pretreatments. *Journal of Cereal Science*, *109*, 103611. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2022.103611
56. Yan, M., & Jiang, S. (2023). Recent trends in functional characteristics and degradation methods of alginate. In BIO Web of Conferences (Vol. 61, p. 01015). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/bioconf/20236101015
57. Zhang, H., Tan, S., Gan, H., Zhang, H., Xia, N., Jiang, L., & Zhang, X. (2023). Investigation of the formation mechanism and β-carotene encapsulation stability of emulsion gels based on egg yolk granules and sodium alginate. *Food Chemistry*, *400*, 134032. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134032
58. Zhang, Y., Qin, Y., Liang, Q., Hu, Y., & Luan, G. (2023). Breaking the temperature limitation of zein-rice starch dough by microwave pre-gelatinization: Morphological, structural and rheological properties of the dough. *Food Research International*, *173*, 113465. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113465

59. Zhao, Y., Dang, X., Du, H., Wang, D., Zhang, J., Liu, R., & Zhong, Q. (2024). Understanding the impact of extrusion treatment on cereals: Insights from alterations in starch physicochemical properties and in vitro digestion kinetics. *Animals, 14*(21), 3144. https://doi.org/10.3390/ani14213144
60. Zheng, Y., Tian, J., Ogawa, Y., Kong, X., Chen, S., Liu, D., & Ye, X. (2020). Physicochemical properties and in vitro digestion of extruded rice with grape seed proanthocyanidins. *Journal of Cereal Science, 95*, 103064. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103064
61. Zhu, F. (2019). Starch based Pickering emulsions: Fabrication, properties, and applications. *Trends in Food Science & Technology*. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.01.012